

УДК 528.029.673, 528.71, 519.237.8

## СРАВНЕНИЕ МЕТОДОВ СПЕКТРАЛЬНОЙ КЛАССИФИКАЦИИ ХВОЙНОЙ РАСТИТЕЛЬНОСТИ ПО ДАННЫМ БЕСПИЛОТНОГО ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА

Гуляева С.И., Литвинович Г.С., Силюк О.О., Цикман И.М.

Институт прикладных физических проблем имени А.Н. Севченко БГУ  
Минск, Республика Беларусь

Проведение подспутниковых исследований с помощью беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) является удобным и перспективным инструментом анализа окружающей среды.

Целью работы является разработка методики авиационного эксперимента с участием БПЛА для решения задачи обнаружения патологий хвойных лесных насаждений по данным спектральной аппаратуры, а также проведение классификации полученных данных для выявления усыхающих образцов хвои. В работе представлено описание методики летного эксперимента для получения спектров коэффициентов спектральной яркости (КСЯ) подстилающей поверхности и первые результаты классификации полученных данных различными методами классификации с оценкой их точности.

В июле 2020 г. выполнялась серия летных экспериментов лесных насаждений вблизи д. Новосады Минской области, в том числе съемки с БПЛА. В качестве полезной нагрузки на вертолет были установлены портативный спектрометр ФСР-04 [1] и смартфон для регистрации фотоизображений. Также выполнялось синхронное надирное измерение белой диффузной пластины спектрометром ССП-600Н [1] на поверхности земли, в 50 метрах от исследуемого лесного массива. Оборудование работало в автоматическом режиме.

Спектрометр ФСР-04 оснащен объективом с регулируемым фокусным расстоянием до 58 мм, поле зрения составляет  $1 \times 7$ . Как спектрометр ФСР-04, так и ССП-600Н имеют рабочий спектральный диапазон: 400–900 нм и детекторы разрядностью 12 бит, в качестве диспергирующего элемента используются вогнутые голографические дифракционные решетки. Поле зрения ССП-600Н составляло  $3 \times 0,5$ .

В качестве БПЛА использовался аппарат UVH-25EL – БПЛА вертикального взлета вертолетного типа, выполненный по одновинтовой схеме с рулевым винтом (рисунок 1). Взлетная масса БПЛА составляет порядка 42 кг, включая полезную нагрузку массой до 5 кг. Управление вертолетом осуществлялось с поверхности земли оператором путем задания параметров движения аппарата.

Спектрометром ФСР-04 и смартфоном сделаны более 700 спектров и снимков подстилающих поверхностей изучаемого лесного массива вблизи д. Новосады. При спектрометрировании использовался режим автоэкспозиции, т.к. это

обеспечивало удобство подбора экспозиции спектра без необходимости внешнего вмешательства.



Рисунок 1 – БПЛА UVH-25EL, оснащенный спектрометром ФСР-04, перед вылетом

Особенностью вертолетных измерений является малая скорость движения аппарата, возможность «зависания» над измеряемым объектом и проведения съемки на небольших высотах по сравнению с самолетными измерениями (около 50 м над поверхностью земли для вертолета). Преимущество вертолетных измерений состоит в отсутствии «смаза» спектральных данных и фотоизображений, появляющегося при движении носителя, а также в возможности регистрации избранных объектов без примеси остальных.

Для спектральных данных приборов ФСР-04 и ССП-600Н проводилась процедура коррекции второго порядка дифракции [2]. Спектры также пересчитывались в абсолютные единицы яркости спектральной плотности энергетической яркости (СПЭЯ). Дальнейшая обработка включала в себя вычисления коэффициента спектральной яркости объектов подстилающей поверхности по формуле (1):

$$КСЯ(\lambda_i) = \frac{R_{ФСР}(\lambda_i)}{R_{ССП\_МС}(\lambda_i)}, \quad (1)$$

где  $\lambda_i$  – длина волны;  $R_{ФСР}(\lambda_i)$  – яркость изучаемого объекта, измеренная спектрометром ФСР-04, в единицах СПЭЯ;  $R_{ССП\_МС}(\lambda_i)$  – яркость молочного стекла, измеренная ССП-600Н, в единицах СПЭЯ. При этом,  $R_{ССП\_МС}(\lambda_i)$  выбиралась как наиболее близкая по времени регистрации к  $R_{ФСР}(\lambda_i)$ .

Предварительно, в лабораторных условиях проводились спектральные измерения образцов

хвои различных степеней усыхания. В качестве образцов выступали срезанные иголки. Измерения проводились с помощью специальной установки CHERRY (CHlorophyll Estimation and Reflectance Registration sYstem) для измерения коэффициента спектральной яркости растительных объектов. В качестве спектрометра использовался Solar M150 [3]. Установка CHERRY позволяет осуществлять проведение измерений с целью вычисления КСЯ природных объектов для надирной геометрии визирования как для условий освещения имитатором прямого солнечного излучения, так и при помощи освещения протяженным источником, имитирующим излучение небесной сферы, в спектральном диапазоне 0,4–2,5 мкм для различных зенитных углов солнца в полностью автоматическом режиме.

Для классификации вертолетных данных применялись классификаторы по обучающим выборкам, созданным в лабораторных условиях. Использовались такие общеизвестные методы классификации, как метод линейного дискриминантного анализа и метод Random Forest [4, 5], причем входными данными для классификаторов служили как рассчитанные значения вегетационных индексов для каждого из спектров, так и, собственно, значения спектров КСЯ в зависимости от длины волны. Для каждого спектра были рассчитаны около 50 различных вегетационных индексов [6, 7], чувствительных к содержанию хлорофилла и стрессу растений. Для оценки точности классификаторов использовались данные фотоизображений, полученные с БПЛА, то есть визуально определялись степени усыхания деревьев: здоровые (1–2 степень) и под воздействием стресса (3–4 степень). Значение, выданное классификатором для объекта, относилось к одному из двух обобщенных классов. Если этот класс соответствовал классу визуальной классификации, то считалось, что классификатор определил класс объекта верно, в противном случае – неверно.

Наилучшие результаты показал метод линейного дискриминантного анализа с классификацией по вегетационным индексам (70 %). Наихудший результат показали линейный дискриминантный анализ с классификацией по длинам волн (45 %) и метод Random Forest с классификацией по длинам волн (45 %).

Нужно отметить, что в результате проведения лабораторных измерений были получены спектральные данные образцов (срезанных иголок) в определенной конфигурации. При спектрометрировании же с борта БПЛА измерения проводились в отличных от лабораторных условиях. Так, изменилась высота, при которой производилась съемка, и, как следствие, область спектрометрирования также изменилась; расположение иголок на живых образцах отличается от конфигурации срезанных иголок, в поле зрения попадают также ветки при натурном эксперименте, особенно при высоких значениях степени усыхания хвои.

Таким образом, в работе была представлена методика летного эксперимента для получения КСЯ подстилающей поверхности по данным, полученным с БПЛА. Примененная контролируемая классификация по методу линейного дискриминантного анализа с использованием вегетационных индексов позволяет верно определять степень усыхания хвои с вероятностью 70 %.

#### Литература

1. Катковский Л.В., Беляев Б.И., Сосенко В.А., Аblaмейко С. В. Аппаратно-программный комплекс «Калибровка» для наземного спектрометрирования подстилающей поверхности и атмосферы // Материалы 7-го Белорусского космич. конгресса. Минск. – 2017. – Т. 2. – С. 36–40.
2. Бручковская С.И., Литвинович Г.С., Бручковский И.И., Катковский Л.В. Алгоритм коррекции дифракции второго порядка дифракции в спектрометре с вогнутой дифракционной решеткой // Журнал прикладной спектроскопии – 2019. – Т. 86, № 4. – С. 620–626.
3. Solar Laser Systems. – Режим доступа: <https://solarlaser.com/devices/multi-purpose-compact-monochromator-spectrograph-m150/>. – Дата доступа: 08.07.2020.
4. Hastie T. The Elements of Statistical Learning: Data Mining, Inference, and Prediction. / T. Hastie, R. Tibshirani, J. Friedman. – 2nd ed. – Springer-Verlag, 2009. – 746 p.
5. Kuhn M. Applied Predictive Modeling / M. Kuhn, K. Johnson. – Springer, New York, 2013. – 600 p.
6. John Gamon, Josep Penuelas, and Christopher Field (1992). A narrow-waveband spectral index that tracks diurnal changes in photosynthetic efficiency. *Remote Sensing of environment*, 41, 35–44.
7. Alphabetical List of Spectral Indices. – Режим доступа: <https://www.harrisgeospatial.com/docs/alphabeticalspectralindices.html>. – Дата доступа: 08.08.2020.